

Systemtechnik und Gewässergüte: Operationalisierung

Natke, H.G.

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 49, 1998,
S.81-98



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Systemtechnik und Gewässergüte: Operationalisierung

von **H. G. Natke**, Hannover*

(Eingegangen 02.04.1998)

Zusammenfassung

Mangelndes Verständnis der Wissenschaftler untereinander kennzeichnet die heutige Wissenschaftskommunikation. Ein Grund hierfür ist sicher die Spezialisierung, die teilweise soweit geht, daß selbst die Vertreter eines Faches das Fach nicht mehr vollständig überblicken und dessen Fachsprache nicht beherrschen. In dem Vorwort von [1] ist der Anspruch formuliert: In der Ausbildung brauchen wir eine Spezialisierung ohne Isolation. Gemeint ist die fachliche Kompetenz, die durch additive Kompetenzen auf anderen Gebieten ergänzt werden muß. Die Systemtheorie vermag als Querschnittsfach¹ mit ihrer integrierenden Eigenschaft und ihren Methoden einen wesentlichen innovativen Beitrag zur Ermittlung der Gewässergüte zu leisten. Die integrierende Eigenschaft bezieht sich auf die Wechselwirkungen/Überschneidungen von gesellschaftlichen, technischen und politischen Bereichen, die einerseits grundverschieden und andererseits durch Sachkonflikte, Interessenkonflikte und Überzeugungskonflikte gekennzeichnet sind. Die Methoden der Systemtechnik als Anwendung der Systemtheorie sind das Werkzeug, um anstelle von den bisherigen Vergleichen und (Teil-) Bewertungen der (simulierten) Auswirkungen vorgegebener fachspezifischer Maßnahmen zu der Lösung der umgekehrten Aufgabe zu gelangen, nämlich der Ermittlung der Maßnahmen, die zum Erreichen einer bestimmten Gewässergüte notwendig sind: Mehrzieloptimierung mit Restriktionen unter Beachtung der Nachhaltigkeit. Hierzu ist Wissen notwendig, anstelle von Spekulationen und Meinungen. Wissen erreicht man nur über Fachwissen und dessen Abstraktion.

Die Abstraktion wird durch Operationalisierung/Mathematisierung geleistet. Die mathematischen Modelle der Subsysteme müssen ermittelt und über ihre Wechselwirkungen synthetisiert werden. In dem Aufsatz werden die zugehörigen Begriffe mathematisch definiert und methodisch aufbereitet. Ein einfaches Beispiel illustriert die Vorgehensweise, die sich wesentlich von dem bisherigen Vorgehen der Aggregation von Indikatoren unterscheidet.

* Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. mult. H. Günther Natke · Curt-Risch-Institut für Dynamik, Schall- und Meßtechnik (CRI) der Universität Hannover · Appelstraße 9 A · D-30167 Hannover.

¹ Wobei nicht über den Generalisten und den Querschnittsspezialisten gestritten werden soll, siehe [2].

1. Einleitung

Die Bewertung von Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässergüte (Qualität von ober- und unterirdischen Gewässern) setzt voraus, daß die Gewässergüte meßbar ist, und daß die Maßnahmen bekannt sind. Die Bewertung der Gewässergüte läuft also auf Simulationen der Auswirkungen bestimmter vorgegebener Maßnahmen hinaus und deren Vergleich. Die umgekehrte Aufgabenstellung, nämlich die Maßnahmen zu ermitteln, die eine angestrebte Gewässergüte unter vorhandenen Restriktionen für z.B. minimale Kosten gewährleisten, ist jedoch die eigentliche Problemformulierung, die hier bevorzugt wird.

Über Systemtheorie bzw. ihre Anwendung, die Systemtechnik, im Zusammenhang mit der Gewässergüte zu berichten, verlangt eine Beschränkung des Themas. Demzufolge wird auf Systeme, auf die Systemsynthese, die Systemanalysis und die Optimierung mit der damit verbundenen Bewertung und Entscheidung zur Erreichung einer optimalen, evtl. nur suboptimalen Lösung der Aufgabe eingegangen. Es werden also Themen wie Planung, normative Szenarien (Entwurf und Gebrauch von Wertesystemen), Produktionsabläufe etc. ausgespart. Ebenso wird nicht auf die Systemidentifikation[3] als Werkzeug zur Kalibrierung, besser zur Korrektur oder Verifizierung und Validierung, von Modellen eingegangen.

Der Ausgangspunkt sei zunächst analysiert. Bei dem Problem „Gewässergüte“ liegt ein nichtlinearer Rückkopplungsprozeß vor, wie er in Abbildung 1 angedeutet ist. Von Subsystemen ausgehend sind Modelle zu erstellen, die unter bestimmten Voraussetzungen eine

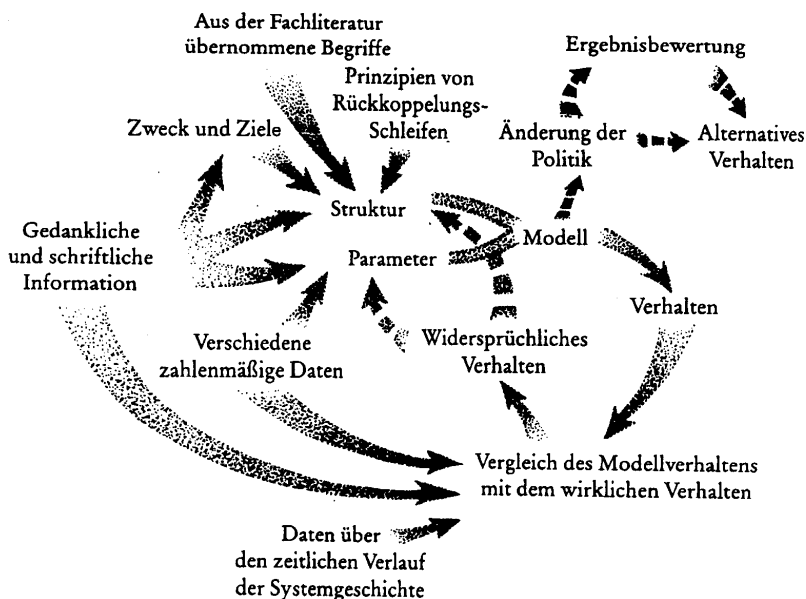


Abb. 1: Prozeß nichtlinearer Rückkopplungen nach [4]

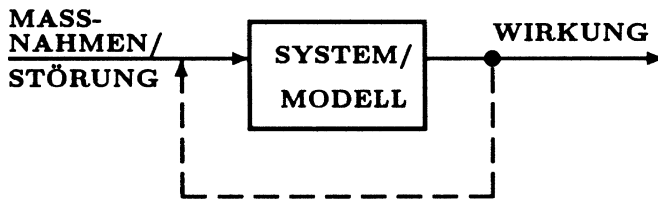


Abb. 2: Ein-/Ausgangsbeziehung mit Rückkopplung

Struktur und damit Parameter besitzen. Informationen verschiedener Art führen zu einem Validieren der Modelle. Es kann sich auch widersprüchliches (nichtinterpretierbares) Verhalten einstellen. Soziale, politische, technische und wirtschaftliche Einflüsse können in der Ergebnisbewertung ein alternatives Verhalten verlangen usw. Technische und nicht-technische Systeme verbunden mit Wertesystemen stehen in Wechselwirkung miteinander, d.h. es können Rückkopplungen auftreten, die im allgemeinen nichtlinear sind. Dieses kann vereinfacht als Ein-/Ausgangsbeziehung mit Rückkopplung dargestellt werden (Abb. 2). Der Eingang besteht aus vorgegebenen Maßnahmen, die Störungen für das existierende System darstellen, gefragt ist nach dem Ausgang, den Auswirkungen der Maßnahmen: Simulation. Die Auswirkungen haben im allgemeinen Rückwirkungen auf die Maßnahmen. Es sind jetzt also Begriffe gefallen wie

System → **Modell** (Struktur, Parameter)

Subsystem → **Submodell**

Prozeß → Ein-/Ausgangsdaten

Vorhersagen, Simulationen.

In diesem Zusammenhang sind auch die Begriffe

Verifizierung, Validierung, Gebrauchsfähigkeit

zu nennen. Verifizierung heißt vereinfacht, daß die Lösung fehlerfrei ermittelt wurde, Validierung bedeutet, daß das verwendete Modell die Wirklichkeit auch beschreibt. Ein Modell ist gebrauchsfähig, wenn es für den vorgesehenen Zweck auch hinreichend genau ist.

Ein **Vergleich** simulierter Einflüsse und Auswirkungen verschiedener (fachlicher) Maßnahmen und deren **Bewertung** anhand von (akzeptierten) Kriterien (Nutzenfunktionen, Maßen) führt zu einer Entscheidung (Reihung, Präferenzen) über die alternativen und/oder sich ergänzenden Maßnahmen (-bündel) zur Erreichung einer erwünschten Gewässergüte. Dieses ist jedoch mathematisch eine **Optimierungsaufgabe**², die unter Berücksichtigung der **Nachhaltigkeit** gelöst werden muß.

² Es sei angemerkt, daß bereits 1976 von K. Lecher und H. Hommel über Optimierung in [5] berichtet wurde.

Innerhalb der Systemtechnik wird eine methodische und zusammenfassende, synthetisierende Analyse und Analysis durchgeführt. Der hierfür notwendige Abstraktionsgrad bedeutet eine Mathematisierung, Operationalisierung der vorkommenden Subsysteme und Prozesse, wie bspw. von sozialen, wirtschaftlichen, ökologischen Systemen, von Wertesystemen etc.

Bezüglich der notwendigen Abstraktion seien zitiert:

Immanuel Kant (1724-1804): „*Ich behaupte aber, daß in jeder besonderen Naturlehre nur soviel eigentliche Wissenschaft angetroffen werden könne, als darin Mathematik anzutreffen ist.*“

George Spencer Brown sagte (1972): „*Mathematics is the way of saying less and less about more and more.*“

Der Autor hat in [6] dem Sinne nach geschrieben: Abstrahieren ist notwendig, also wählen wir die höchste Stufe der Abstraktion, die Mathematik mit der Eigenschaft, durch ihre Klarheit und Transparenz die geringsten Mißverständnisse aufkommen zu lassen. Diese Aussage trifft natürlich nicht auf die Interpretation der Ergebnisse zu.

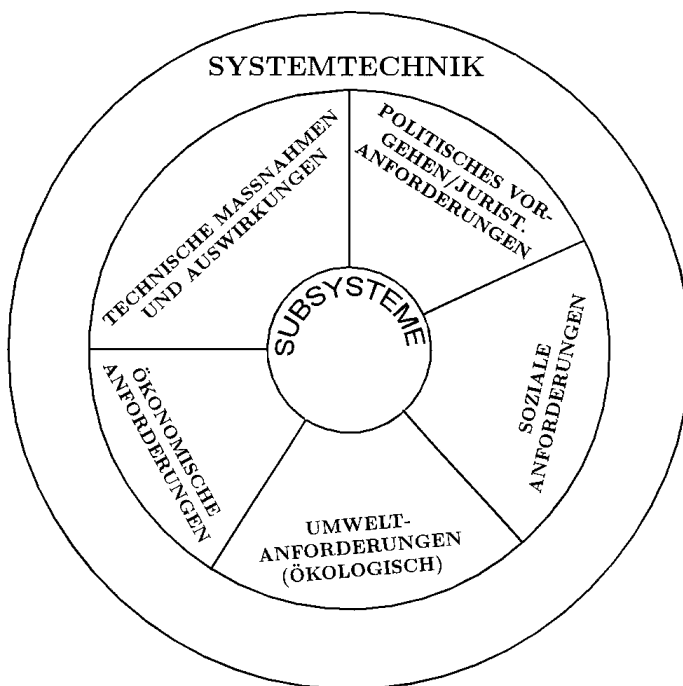


Abb. 3: Systemisch zu behandelnde Subsysteme gekennzeichnet durch Anforderungen und Maßnahmen

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit zeigt die Abbildung 3 die verschiedenen sich gegenseitig beeinflussenden Subsysteme, die systemisch zusammenzufassen sind.

2. Was ist Systemtechnik?

Diese Frage wird innerhalb der getroffenen thematischen Einschränkung im folgenden, zumindest andeutungsweise, versucht zu beantworten. Technologie und Management sind zwei wesentliche Arbeitsgebiete (Abb. 4), eingebettet in weitere Gebiete, die die Systemtechnik bestimmen. Zusammengefaßt läßt die Abbildung 4 viele Interpretationen zu. Die Abbildung kann bezüglich einer Forschungs**institution** wie bspw. eines SFBs aber auch hinsichtlich eines Forschungs**prozesses** interpretiert werden, wobei hier als wesentlich der **Informationsraum** hinzukommt. Die verschiedenen Informationen spielen bei Rückkopplungen (s. auch Abb. 1) eine herausragende Rolle.

In der Systemtechnik sind vier Dimensionen wesentlich:

- Die Zeitdimension, die sich auf den Lebenszyklus, der die Systemevolution (Langzeitverhalten der betrachteten Gewässer) umfaßt, und die interessierenden Zeit-Teilintervalle (z.B. die der Momentandynamik) innerhalb des Lebens eines Systems bezieht,
- Logikdimension, die die Arbeitsphasen innerhalb des Lebenszyklus enthält,
- die Wissensdimension, die sich aus den beteiligten Fächern (s. Abb. 3) innerhalb des Themas zusammensetzt, und schließlich
- die gesellschaftliche Dimension, die die Beteiligten/Betroffenen mit ihren Vorlieben, ihrer Kreativität und ihrem Wissen (Rückkopplung!), ihrem Risikoverhalten, Managementstil etc. einbezieht.

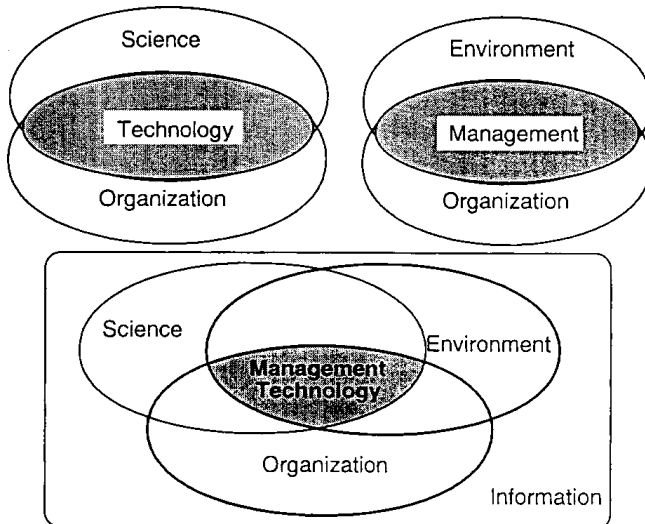


Abb. 4: Zusammenfassung nach Sage [7]

Aufbauend auf der Aktivitätsmatrix [8] sei noch der morphologische Kasten (Abb. 5 [8]) erwähnt, der gegenüber der Aktivitätsmatrix das Wissen (auf der Kote dargestellt) enthält. Das Wissen bezüglich des Themas setzt sich aus den einzelnen mitwirkenden Fächern zusammen, die

- die biologische und
- die chemische Gewässergüte betreffen,
- den Boden,
- die Luft,
- die Gewässerstruktur,
- das Abwasser,
- das Recht usw.

einbeziehen. Die Abszisse trägt die logische Dimension und die Ordinate (aus der Bildebene tretend) die Zeit. Der morphologische Kasten zeigt ebenfalls durch Herausgreifen eines Teilarbeitsgebietes die Wechselwirkungen der verschiedenen Dimensionen.

Betont sei in diesem Zusammenhang die ganzheitliche Dynamik, d.h. es sind sowohl kurzzeitige (Momentandynamik) als auch langzeitige Vorgänge (Systemevolution) zu modellieren. Kurz gefaßt, es existieren verschiedene Zeitskalen. Das Wertesystem wurde bereits erwähnt, das die Grundlage für die Entscheidung bildet. Mathematisch liegt also eine Mehrziel-Optimierungsaufgabe mit Restriktionen vor: Gesucht sind die Maßnahmen, deren Auswirkungen optimal sind, um eine bestimmte, d.h. vorgegebene erwünschte Gewässergüte zu erhalten. Diese Betrachtung schließt Sensitivitätsuntersuchungen ebenso ein wie die Untersuchungen zur Homöostase, letzteres ist die Stabilität der Systeme gegenüber äußeren Störungen. Die klassischen Parametersensitivitäten sind ein Teil des

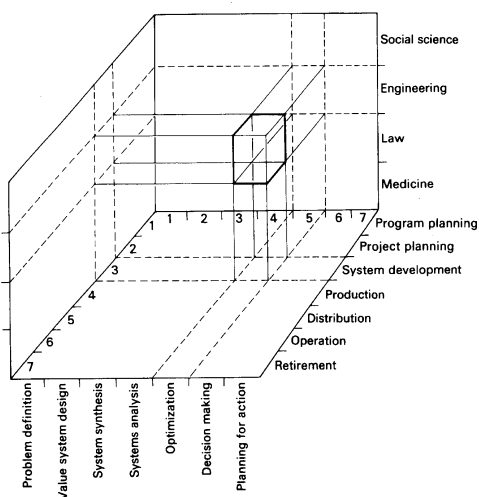


Abb. 5: Morphologischer Kasten nach Sage [8]

Optimierungsalgorithmus. Es sind jedoch auch die Submodellsensitivitäten[3] zu untersuchen: Wie stark sind die Wechselwirkungen der einzelnen Submodelle innerhalb des Gesamtmodells? Damit läßt sich dann die Frage beantworten: Müssen alle Submodelle in dem Gesamtmodell für die Optimierungsaufgabe enthalten sein? Die Ermittlung von Submodellsensitivitäten sind im Gegensatz zu den Parametersensitivitäten als differentielle Fehleranalyse Gegenstand der Forschung. Auch die selektive Sensitivität[9] spielt hierbei eine große Rolle, sie ermöglicht die Maßnahme zu ermitteln, die theoretisch eine alleinige ausgewählte Auswirkung besitzt. Die selektive Sensitivität wurde für zeitvariante und nichtlineare Modelle bisher noch nicht untersucht.

Um den Zusammenhang mit der Optimierung zu verdeutlichen, sei angemerkt: Eine Bewertung von simulierten Auswirkungen aufgrund vorgegebener Maßnahmen (Alternativen) und eine Entscheidung anhand erarbeiteter (akzeptierter) Kriterien (Reihenfolge, Präferenzen) sind dort notwendig, wo das Optimum nicht direkt entscheidbar/berechenbar ist. Das Bewertungsmodell umfaßt somit [10]:

- Kriterien (Erfüllungsfaktoren, -kriterien, die für das Problem wichtig sind.)
- Eine Hierarchie der Kriterien (Welche Kriterien sind Teilkriterien von höherwertigen Kriterien? → Interaktionsmatrizen: Wenn i sich auf j bezieht, dann wird eine 1 in die Wechselwirkungsmatrix, anderenfalls eine 0 geschrieben. Jedes geordnete Paar von Alternativen ist damit in Beziehung (0 oder 1) gesetzt. Danach muß die Interaktionsmatrix auf ihre Struktur untersucht werden, um schließlich auf einen Graphen (mit einer Senke → Minimum) zu kommen.)
- Ermittlung der relativen Gewichte für die einzelnen Kriterien (Steht die Hierarchie fest, so sollten die Gewichte für die einzelnen Verzweigungen festgelegt werden.)
- Wahl von Erfüllungsmaßen und von Vertrauensgewichten (Die Ermittlung des Erfüllungsgrades ist der erste Schritt, die Festlegung, Einschätzung seiner Genauigkeit (Konfidenz) der zweite Schritt.)
- Ermittlung der Wertepunktzahl aus Gewichten multipliziert mit den Erfüllungsgraden für jedes Kriterium und alle betrachteten Alternativen.
- Festschreibung einer Rangordnung (Präferenz, Reihenfolge der Alternativen, hier der Wertepunktzahlen.)

Ein Bewertungsmodell muß nicht nur ein optimales System liefern sondern auch Informationen über die Folgen seiner Einführung.

3. Einige Begriffe

Das **System** S kann jetzt als das Objekt in seiner Umgebung im Sinne der Operationalisierung, der Mathematisierung mengentheoretisch als geordnete Menge der Attribute, Relationen und Subsysteme definiert werden [11]. Ein **Subsystem** S ist rekursiv als System definiert. Ein **Modell** M ist eine Abbildung/Transformation von $S : M = F\{S\}$. Entsprechend ist ein **Submodell** eine Abbildung von S bzw. eine Teilmenge von M . Die Zusammenhänge sind in Abbildung 6 dargestellt. Jedes System dient einem bestimmten Zweck (P), deshalb genügt eine Teilmenge $S|P$ von S zu seiner Beschreibung, die nämlich keine nichtrelevanten Attribute enthält. Jedes Modell verfolgt ein Ziel (G) (z.B. dient es der Bemessung oder der Optimierung, beide Ziele verlangen verschiedenartig komplizierte Modelle), die Abbildungen dieser Teilmenge sind also zielabhängig verschieden. Eine ideale Abbildung $M|G_{ref}$ dieser Teilmenge ist dann das Referenzmodell. In vielen Fällen sind die zugeordneten Mengen unbekannt, so daß man zu approximativen Beschreibungen greifen muß, die zu unterschiedlichen Modellen (Modellklassen) führen.

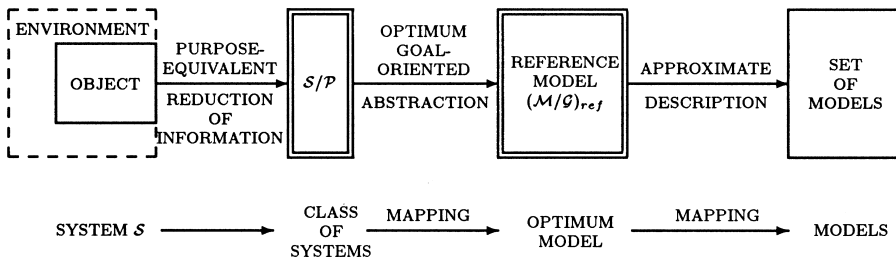


Abb. 6: Das System und seine Modelle

Die Begriffe Verifizierung, Validierung und Gebrauchsfähigkeit können jetzt operationalisiert definiert werden: Ein Modell heißt **verifiziert**, wenn die zur Modellbildung verwendete Information sich rekonstruieren läßt. Sofern gemessene Daten verwendet wurden, können sie natürlich nur innerhalb des benutzten Qualitätskriteriums (s. z.B. das Zielfunktional der Fehlerquadratmethode) wiedergewonnen werden, hier bezieht sich die Verifizierung auf Prozeßdaten. Ein Modell heißt **validiert**, wenn es eine homomorphe Abbildung des Systems³ ist. Mit anderen Worten, neben den Prozeßdaten stimmen auch die Strukturen⁴ von System und Modell überein. Im linearen Fall läßt sich die Struktur durch die Eigensysteme (z.B. Eigenschwingungsgrößen bei elastomechanischen Systemen) von System und Modell ausdrücken. Damit sind die Modellfehler bekannt. Für ein zielgerichtetes Modell genügt dieses jedoch nicht, es muß **gebrauchsfähig** sein, d.h. die Fehler müssen für das Ziel hinreichend klein sein.

Wir bezeichnen auch eine Anzahl von Gleichungen als System, also ein abstraktes Gebilde: Zwischen System und Modell besteht *strukturell* und/oder *topologisch* kein Unterschied. Deshalb spricht man z.B. auch von einem Ersatzsystem oder Systemmodell.

Die verschiedenen Modelle werden klassifiziert. Es seien nur einige Modelltypen herausgegriffen. Es gibt beschreibende Modelle, Vorhersagemodelle, Bewertungsmodelle, die hier keiner besonderen Erklärung bedürfen. Bei qualitativen Modellen genügen die Variablen Ordinalskalen (z.B. Kardinalzahlen als Maß für die Mächtigkeit von Mengen) und Nominalskalen, die Variablen quantitativer Modelle werden mit Funktional-, Intervall- und Verhältnisskalen gemessen. Diese Unterscheidung zu treffen ist wichtig, denn häufig sind quantitative Modelle, wie bspw. Differentialgleichungssysteme infolge unvollständigen Wissens nicht verfügbar. Es muß dann auf qualitative Modelle zurückgegriffen werden, die z.B. durch linguistische Variablen oder durch Graphen definiert werden können.

Zwei weitere Modelltypen sind noch von Interesse: das direkte und das inverse Modell. Das direkte Problem aufgrund des direkten Modells zu lösen, bedeutet bspw. bei einem

³ Hier ist die Operationalisierung offenkundig: Wie könnte man sonst von einem realen Objekt (in seiner Umgebung) durch eine mathematische Operation, nämlich eine Transformation, eine abstrakte Konstruktion wie das Modell erhalten?

⁴ Die Struktur bezeichnet die Art der Relation, den Typ einer Gleichung

linearen algebraischen Gleichungssystem, die rechte Seite des Gleichungssystems auszurechnen. Das inverse Problem erster Art zu lösen heißt dabei, die Unbekannten zu bestimmen (theoretisch mittels des inversen Operators, in dem B. der inversen Systemmatrix). Das inverse Problem 2. Art besteht darin, aus Prozeßdaten den Operator, hier die Systemmatrix zu ermitteln. Das inverse Problem zu lösen ist allgemein ungleich schwieriger als das direkte Problem zu lösen. Das direkte Modell (Abb. 7), in der Ein-/Ausgangsbeziehung beschrieben, ist dadurch gekennzeichnet, daß der Istzustand (Anfangsbedingungen) und die Maßnahmen vorgegeben sind, und man fragt: Was wird aufgrund dieser Vorgaben geschehen? Der Ausgang besteht dann in der Vorhersage der Auswirkungen. Beim inversen Modell ist der Eingang wieder der Istzustand und zusätzlich jetzt aber der gewünschte Sollzustand, und es wird nach den notwendigen (und optimalen) Maßnahmen gefragt (Abb. 8).



Abb. 7: Das direkte Modell



Abb. 8: Das inverse Modell

Die Tabelle 1 stellt den Sachverhalt nochmals zusammen.

Als typische Vertreter sind hier Karl Marx und K. R. Popper genannt. Karl Marx hat aus systemtechnischer Sicht, entkleidet der Ideologie, die nachstehenden Fehler gemacht:

- Er hat direkte Modelle anstelle inverser Modelle gewählt,
- er hat lineare Modelle anstelle von nichtlinearen Modellen zugrundegelegt. Das mögliche Chaos, hier gekennzeichnet durch große Auswirkungen bei kleinen Störungen der Anfangsbedingungen, wurde vernachlässigt.
- Er hat Determinismus statt Handlungsfreiheit und Zufall vorausgesetzt.
- Vorhersagen statt Möglichkeiten und Szenarien kennzeichnen seine Arbeiten.

Tab. 1: Gegenüberstellung von direktem und inversem Modell nach Olah [13]

Modell	Ziel	Fragestellung	Vertreter
Direkt	Vorhersage	Wohin gehen wir?	Marx
Invers	Steuerung	Wie können wir das Problem lösen?	Popper

Innerhalb der zu betrachtenden umweltrelevanten Systeme⁵ sind verschiedene Ebenen, nämlich globale, nationale und regionale Ebenen, zu behandeln, die mathematisch auf verschiedene räumliche Skalen führen. Die zeitlichen Skalen der Systemevolution und Momentandynamik wurden bereits erwähnt. Unter dem Leitbild der Nachhaltigkeit, zu dem die Operationalisierung später eingeführt wird, sind weiter Maße einzuführen. Dieses sind z.Z. vereinfacht Umweltindikatoren⁶, die ökonomische, ökologische und soziale Systeme → (Subsysteme) **gleichzeitig** berücksichtigen. Die Abbildung 9 gibt den Aggregationsgrad abhängig von der Datenmenge mit ihrem möglichen Verwendungszweck wieder. Schraffiert ist statt dessen in Abbildung 9 die Verwendung mathematischer Modelle angedeutet.

Um vorgegebene zeitabhängige Systemzustände oder auch Sollzustände (Maße) zu erreichen, sind (Management-) Regeln, Prinzipien und Strategien in Maßnahmen umzusetzen, was **Wissen** anstelle von Spekulationen und Meinungen erfordert. Wissen erreichen wir aber nur über (Fakten und) Abstraktion, also Operationalisierung: Aufstellen von verifizierten, validierten und gebrauchsfähigen Modellen. Die Werkzeuge hierfür sind

- Subsystemmodellierung
- Wechselwirkungsanalyse (Kopplungen)
- Modellreduktion (Dimensionsreduktion)
- Vorhersage und Simulation
- Wertesystem

was zunächst auf

- suboptimale fachspezifische Lösungen führt, die dann
- zu einer optimalen Lösung des Gesamtmodells synthetisiert werden müssen: Optimierung unter Mehrzielen (→ inverses Modell !). Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, daß die Modellsynthese sowohl quantitative als auch qualitative Modelle umfassen kann, was Forschungen notwendig macht. Ebenso ist die Optimierung derart zusammengesetzter Modelle (Analysis qualitativer Modelle) ein Forschungsaspekt. Die für die Synthese erforderlichen Informationen (Modelle) sind Fachinformationen; mit anderen Worten, die Systemtechnik ersetzt nicht das Fachwissen!

⁵ Das sind Systeme, die durch anthropogene Aktivitäten Einfluß auf die natürliche Umwelt haben.

⁶ Aggregierte Indikatoren

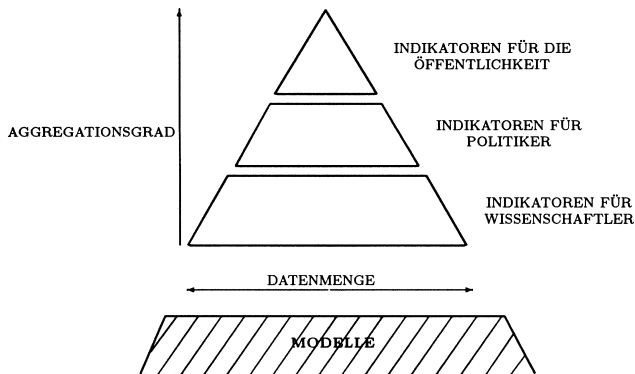


Abb. 9: Aggregierte Indikatoren in Erweiterung von [16]

Die Nachteile des herkömmlichen Vorgehens über Simulation und Vergleich einschließlich der Ermittlung aggregierter Indikatoren sind folgende:

- Es wird die Lösung des direkten Problems anstelle der des inversen Problems bestimmt.
- Eine Aggregation sagt nichts zu den Kopplungen aus.
- Wertesysteme, Ziele, Nachhaltigkeit gehen nur implizit ein.

Hieraus folgt konsequenterweise als innovatives Vorgehen:

1. Schritt: Modellbildung für die Subsysteme einschließlich z.B. sozialer Systeme⁷
2. Schritt: Maßnahmenbezogenes Synthetisieren der Modelle (Kopplungen von qualitativen mit quantitativen Modellen),
3. Schritt: Lösen des inversen Problems, also der Optimierungsaufgabe zur Ermittlung optimaler Maßnahmen zum Erzielen einer erwünschten Gewässergüte unter dem Leitbild der Nachhaltigkeit⁸.

Was ist eigentlich Nachhaltigkeit? Eine nachhaltige Entwicklung ist ein akzeptiertes optimiertes Zusammenwirken der Subsysteme Gesellschaft, Natur und Wirtschaft unter den verschiedenen Maßnahmen (die sowohl technischer als auch nichttechnischer Art sein können). Und was bedeutet sie operationalisiert? Die Nachhaltigkeit kann als ein Stabilitätsproblem der Lösung des Gesamtproblems aufgefaßt werden: Eine Gleichgewichtsuntersuchung innerhalb der räumlichen und zeitlichen Skalen (wobei natürlich die Sättigung mit bspw. Schadstoffen ausgeschlossen ist). In dem Zusammenhang spielt auch die Homöostase, die Stabilität des Systems gegenüber äußeren Störungen, eine Rolle.

⁷ Die Modellbildung von sozialen Systemen ist schwierig. Jedoch sind auch hier „Energieausdrücke“ in Form von *social welfare functions* bekannt (s. auch die *Energie Prozessoren* (EP) von Cempel, Natke, Winniwarter [14,15]); ansonsten sei auf qualitative Modelle verwiesen. Lebensqualität L kann bspw. als Gegenteil von Risiko R eingeführt werden [16]: $L=1-R$

⁸ Es sollen ja nicht die Fehler von K. Marx wiederholt werden!

4. Beispiel zur Operationalisierung mittels unscharfer Logik

Die Ausführungen folgen der Dissertation von I.-C. Tulbure [16]. Dieses Beispiel zeigt eine Berechnung eines Umweltindikators aufgrund eines Modells unter Verwendung der unscharfen Logik (fuzzy logic) anstelle einer mehr oder weniger willkürlichen und einfachen Aggregation. Der Umweltindikator in dem Beispiel setzt sich aus Luft- (API) und Wasserverschmutzungsindikatoren (WPI) zusammen, die ebenfalls mittels unscharfer Logik ermittelt sind.

Die Abbildung 10 zeigt Möglichkeiten zur Bildung des Umweltindikators. Neben Mittelwerten ist hier die unscharfe Logik angeführt. Die Abbildung 11 deutet die Vorgehensweise an. Fuzzifizierung bedeutet die Einführung linguistischer Variablen, Entfuzzifizierung also die umgekehrte Abbildung. Die Regelbasis enthält die Operatoren zur Verknüpfung der linguistischen Variablen. Die Verknüpfungsvorschriften stellen das Wissen dar, das in der Regelbasis entsprechend der Wissensbasis in einem wissensbasierten System abgelegt ist. Die Inferenz hat die Aufgabe, aus Aussagen und dem Wissen Folgerungen zu ziehen.

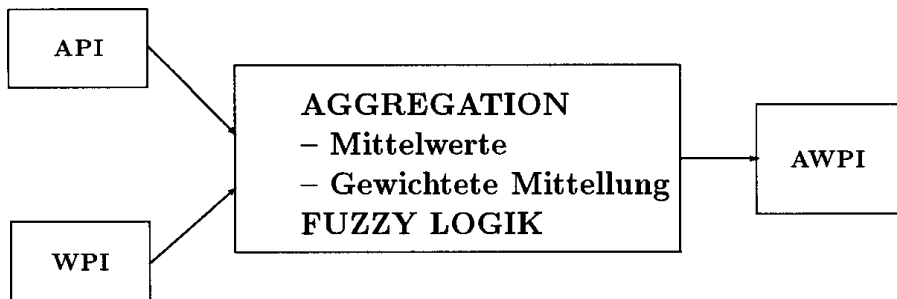


Abb. 10: Möglichkeiten zur Bildung eines Umweltindikators

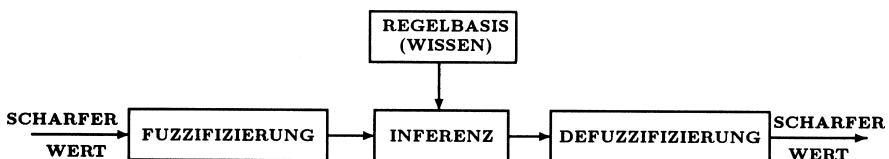


Abb. 11: Zur Einführung der unscharfen Logik

4.1 Der Wasserverschmutzungsindikator

Das Beispiel zum Wasserverschmutzungsindikator WPI nach [16] ist vereinfacht aus den vier Kenngrößen

- Chlorid
- Sauerstoffgehalt (O_2 -Gehalt)
- biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB_5) und
- organisch gebundener Kohlenstoff (total organic carbon TOC)

zusammengesetzt. Theoretisch können natürlich n , n eine natürliche Zahl, Komponenten über die unscharfe Logik zum WPI zusammengesetzt werden. Die Abbildung 12 zeigt die zum Chlorid gehörenden Zugehörigkeitsfunktionen (membership functions) und die Ausprägungen μ wieder, zu deren Wahl hier nichts ausgeführt wird. Es sei nur als Beispiel erwähnt: Chlorid mit 200 mg/l und $\mu < 0,5$ ist mit der linguistischen Variablen *klein* belegt und für $\mu = 0,5$ mit der Variablen *mittel*.

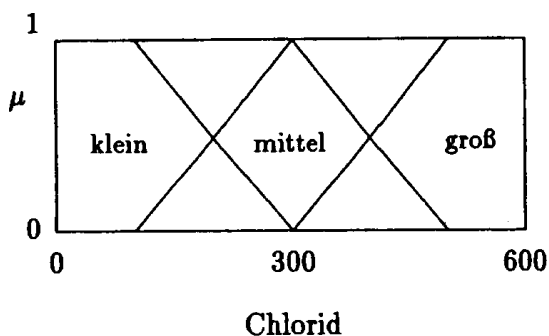


Abb. 12: Zugehörigkeitsfunktionen und Ausprägungen von Chlorid

Die Abbildung 13 zeigt die trapez- und dreieckförmigen Zugehörigkeitsfunktionen und die Ausprägungen auf dem Intervall $[0,1]$ für den Wasserverschmutzungsindikator. Die Ausprägungen sind über die Regelbasis verknüpft, die hier als prinzipielles Schema in der Tabelle 2 zusammengefaßt ist.

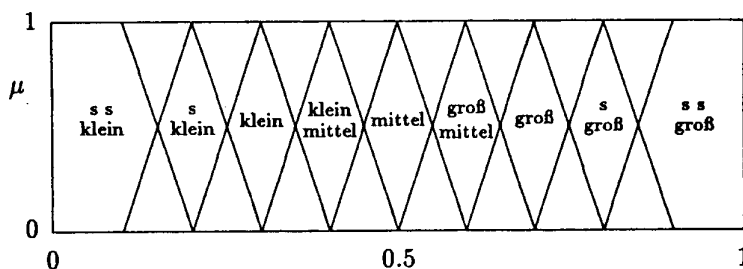


Abb. 13: Zugehörigkeitsfunktionen und Ausprägungen für den WPI

Tab. 2: Prinzipielles Schema der Regelbasis für den WPI

Nr.	Inputs				Output WPI
	Chlorid	O ₂ -Gehalt	BSB ₅	TOC	
1	klein	groß	klein	klein	ss klein
2	mittel	groß	klein	klein	s klein
3	mittel	mittel	klein	klein	klein
4	mittel	mittel	mittel	mittel	klein mittel
5	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
6	mittel	mittel	mittel	groß	groß mittel
7	mittel	mittel	groß	groß	groß
8	mittel	klein	groß	groß	s groß
9	groß	klein	groß	groß	ss groß

4.2 Umweltindikator gebildet aus dem Wasser- und Luftverschmutzungsindikator

Das Vorgehen ist bereits in Abbildung 10 wiedergegeben. Die Abbildung 14 enthält entsprechend dem vorher angedeuteten Vorgehen die Zugehörigkeitsfunktionen und Ausprägungen der linguistischen Variablen aus API und WPI zusammengeführt. Die Tabelle 3 gibt schematisiert die Regelbasis wieder.

Hinsichtlich weiterer Details sei auf [16] verwiesen. Die Ergebnisse mittels „unscharfer Modelle“ können folgendermaßen zusammengefaßt werden:

- Basisindikatoren für Schadstoffe führen auf eine Bewertung des Umweltzustandes
- Die Anwendung der *fuzzy logic* ist mehr als eine Mittelwertberechnung
- Die explizite (und scharfe) Kenntnis der Wechselwirkung der Submodelle ist bei der Anwendung der unscharfen Logik nicht notwendig
- Das Ergebnis ist von der Wahl der Zugehörigkeitsfunktionen und den Intervallen abhängig
- Das Vorgehen besitzt eine hohe Bewertungstransparenz (natürlich sofern die Zugehörigkeitsfunktionen etc. angegeben sind!)

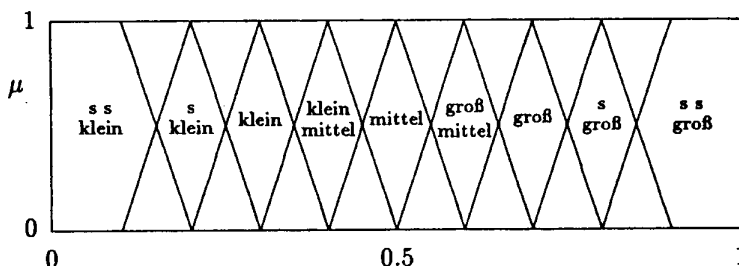


Abb. 14: Zugehörigkeitsfunktionen und Ausprägungen für die API und WPI auf dem Intervall [0,1]

Tab. 3: Schematische Regelbasis für den Umweltindikator

NR.	INPUTS		OUTPUT AWPI
	API _n	WPI	
1	SEHR SEHR KLEIN	SEHR SEHR KLEIN	SEHR SEHR KLEIN
2	SEHR SEHR KLEIN	SEHR KLEIN	SEHR SEHR KLEIN
3	SEHR KLEIN	SEHR KLEIN	SEHR KLEIN
9	MITTEL	MITTEL	MITTEL
16	SEHR GROSS	SEHR SEHR GROSS	SEHR SEHR GROSS
17	SEHR SEHR GROSS	SEHR SEHR GROSS	SEHR SEHR GROSS

Die obigen Indikatoren, gebildet mittels der unscharfer Logik, sind hier lediglich exemplarisch aufgeführt.

Es sei weiter hervorgehoben, daß die Modellierung der Dynamik des Umweltzustandes (einer Region) auf

- klassischen, quantitativen Submodellen (Bilanzen, Energien etc.) und
- qualitativen Submodellen basiert,

die synthetisiert werden müssen.

5. Operationalisierung von Szenarien

Wie schon erwähnt, gibt es weitere qualitative Modelle. So lassen sich bspw. Szenarien ebenfalls operationalisieren [17].

Das (dynamische) Verhalten eines Systems wird als geordnete Folge von Zuständen beschrieben. Der Systemzustand ist durch die Menge der (parameterabhängigen, häufig mit der Zeit als Parameter) Variablen im Zustandsraum mit ihren Werten ausgedrückt.

Ein partieller Zustand ist durch eine Abbildung eines Systemzustandes definiert. Er kann auch gleich dem Zustand selbst sein, oder einer Teilmenge der Zustandsvariablen mit ihren Werten. Es sei die partielle Ordnung

$$\sqsubset_s$$

eingeführt. Das Symbol bedeutet *weniger allgemein als*. Im Einzelnen gilt für den Zustand s und den partiellen Zustand p eines Systems d mit $d \in V$, $V_p \subset V$, $p \in V_p$:

$$\begin{aligned}
 s \sqsubset_s p &\Leftrightarrow \\
 s &= \{(v, x) / v \in V, x \text{ in dem Bereich } v\} \\
 p &= \{(v, x) / v \in V_p, x \text{ in dem Bereich } v\} \\
 \text{und} \\
 \forall v \in V_p, (v, x_s) \in s \text{ und } (v, x_p) \in p &\Rightarrow \\
 x_s &\sqsubseteq_v x_p.
 \end{aligned}$$

Ein Szenario ist nun definiert als Folge partieller Zustände mit identischer Teilmenge der Variablen für alle partiellen Zustände: $V_p \subseteq V$,

σ ist ein Szenario von $d \Leftrightarrow$

$\sigma = \langle p_1, p_2, \dots, p_n \rangle$ und

$\forall p_i, p_i = \{(v, x) \mid v \in V_p, x \text{ in dem Bereich } v\}$.

Ein Szenario kann ebenfalls eine Folge von Zuständen sein, wobei bestimmte Zustände der Folge eliminiert sind. Partielle Zustände müssen nicht direkt benachbarte Zustände sein.

Szenarien können unter bestimmten Voraussetzungen zum Systemverhalten transformiert werden, d.h. aus ihnen kann der Systemzustand und das zugehörige System rekonstruiert/ identifiziert [11] werden. Diese Abbildungen sind mit den Termen *garantiert*, *verhindern*, *bedingt durchführbar* verknüpft. Sie bilden die teleologischen (primitiven) Operatoren⁹.

6. Abschließende Bemerkungen

Zeitabhängige Systeme bedürfen zu ihrer Behandlung der holistischen Dynamik. Dieses führt auf zeitvariante Modelle, die mathematisch schwierig zu handhaben sind. Möglichkeiten zu ihrer Behandlung sind [18]:

- Skalentrennung; für einen festen Wert der Lebenszeit wird ein zeitinvariantes Modell auf einem bestimmten Intervall um diesen Wert eingeführt.
- Zustandsbeschreibung des Systems **und** der zeitabhängigen Parameter (indirekte Skalentrennung).
- Hilberttransformation und Anwendung des Spektraltheorems: Die Momentandynamik ist im allgemeinen hochfrequent, die Systemevolution im allgemeinen tieffrequent mit separierbaren Frequenzintervallen. Letzteres wird im Bildraum genutzt.

Die Operationalisierung ist eine Notwendigkeit zur systemischen Erreichung optimaler und nachhaltiger Maßnahmen für eine erwünschte Gewässergüte (d.h. Lösen eines inversen Problems!). Damit ist es möglich, ein wissensbasiertes System (Umweltmanagementsystem) als offenes System zu erstellen. Die Ausführungen zeigen ebenfalls, daß die Systemtechnik als methodenorientierte und integrierende Wissenschaft es vermag, die Aufgabe auch unter **unvollkommenem Wissen** zu erreichen. Es sind außerdem Perspektiven aufgezeigt, wie wünschenswerte und vorgegebene Umweltzustände unter Einbezug miteinander konkurrierender und sich widersprechender Ziele (technische, soziale, wirtschaftliche usw.) erreichbar sind. Allerdings bedarf dieses noch einiger Forschungsarbeiten: Die Formulierung des Optimierungsproblems innerhalb der Gewässergüte ist noch offen (Nutzenfunktionen, Wichtungen, Restriktionen) einschließlich der Formulierung der operationalisierten Submodelle selbst mit ihren Kopplungen. Mathematisch bedarf die Verknüpfung der verschiedenen Submodelltypen innerhalb des Gesamtproblems noch subtiler Untersuchungen, hierzu zählen auch die verallgemeinerten Sensitivitäten.

⁹ Modelle sind zielabhängig, s. Abschnitt, auf die hier im einzelnen nicht eingegangen werden soll.

7. Schrifttum

1. NATKE, H. G., CEMPEL, C. (Hrg.), 1995, *Summer School on Systems Engineering*, Collection of Lecture Notes, Mitteilung des Curt-Risch-Instituts für Dynamik, Schall- und Meßtechnik der Universität Hannover, CRI-K1/95
2. NN, 1996, Entscheidungsprozesse im Spannungsfeld Technik - Gesellschaft - Politik, VDI Report 25, Düsseldorf
3. NATKE, H. G., 1992, *Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse - Identifikation schwingungsfähiger Systeme*, 3., überarbeitete Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH. Braunschweig, Wiesbaden
4. BRIGGS, J., PEAT, F., D., 1990, *Die Entdeckung des Chaos*, Carl Hanser Verlag München, Wien
5. LECHER, K., Hommel, H., 1976, Planung wasserwirtschaftlicher Systeme; Wasser wirtschaft 66, 12, 45-49
6. NATKE, H. G., 1994, Model verification and validation in engineering, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Vol. 42, No. 4
7. SAGE, A. P., 1995, *Systems Management for Information Technology and Software Engineering*, Wiley Series in Systems Engineering, John Wiley & Sons New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore
8. SAGE, A.P., 1977, *Methodology for Large-Scale Systems*, McGraw-Hill Book Comp. New York
9. BEN-HAIM, Y., PRELLS, U., 1993, Selective sensitivity in the frequency domain, Part 1: Theory, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 7, No. 5, 461-475
10. NATKE, H. G., 1992, Systemtheorie/Systemtechnik, unveröffentlichtes Vorlesungsmanuskript, Curt-Risch-Institut der Universität Hannover
11. NATKE, H. G. , 1997, Uncertainties in mechanical system modelling: definitions, models, measures, applications, in: [12]
12. NATKE, H. G., BEN-HAIM, Y. (eds.), 1997, *Uncertainty: Models and Measures*, Mathematical Research Vol. 99, Akademie Verlag Berlin
13. OLAH, N., 1995, Spielräume, *Ein interdisziplinäres Schulbuch*, Eigenverlag, Düsseldorf
14. CEMPEL, C., NATKE H. G., 1995, Energy processing and energy processors in systems engineering, in [1], 189- 218
15. WINIWARTER, P., CEMPEL C., 1995; Birth and death processors 1: Time energy equivalence in system life and the fractal dimension of system time, 19-th Symposium of International System Science Society, Amsterdam, June 1995.
16. TULBURE, I.-C., 1997, *Zustandsbeschreibung und Dynamik umweltrelevanter Systeme*, Monographie, Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH - CUTEC-Schriftenreihe Nr. 25

17. FRANKE, D. W., 1991, Deriving and using descriptions of purpose, Functional reasoning and functional modeling, IEEE Expert, April 1991, 41-47
18. NATKE, H.G., CEMPEL, C., 1995, System analysis and identification - A holistic approach, in: [1], 155-187